

Eine neue Methode der mechanischen Nervenreizung.

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt

von der Philosophischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn.

Von

WERNER WIEBE

aus Mülheim (Ruhr).

19



36

Berichterstatter: Prof. Dr. L. Grebe.



EINLEITUNG.

Ein Nerv, der vom Organismus getrennt wird, behält unter günstigen Bedingungen noch längere Zeit die Eigenschaft der Reizbarkeit und die Fähigkeit, Reize fortzuleiten. Besonders leicht gelingt dies bei Kaltblüternerven, da man bei diesen nicht auf die genaue Einhaltung einer bestimmten Temperatur zu achten braucht. Die meisten Versuche dieser Art werden daher mit Fröschen (*Rana esculenta* und *Rana temporaria*) ausgeführt. Die Nerven werden unmittelbar nach der Tötung des Frosches herauspräpariert und in isotonischer Ringerlösung aufbewahrt. Man kann die Präparation auch so ausführen, daß der Nerv mit einem Muskel oder einem ganzen Schenkel verbunden bleibt. Eine Reizung des Nerven bewirkt dann eine Muskelkontraktion.

Schon der bekannte Versuch von Galvani 1789, der zur Entdeckung der „galvanischen Elektrizität“ führte, bedeutete eine elektrische Nervenreizung. Seit langem ist es auch bekannt, daß mechanische, chemische, osmotische und thermische Reize ganz ähnliche Wirkungen wie elektrische Reize haben. Die letzteren lassen sich sehr bequem und genau abstimmen und schädigen den Nerven im allgemeinen nicht. Daher sind sie in zahlreichen Arbeiten eingehend untersucht worden und haben weitgehend Aufschluß über das Wesen der Nervenleitung gegeben. Zur vollständigen Kenntnis der Nervenfunktion ist es erwünscht, auch das Verhalten gegenüber den anderen Reizarten möglichst genau zu kennen.

Unter einem Reiz versteht man allgemein eine Veränderung der äußeren Lebensbedingungen. Er kann z. B. auch eine Veränderung der Reizbarkeit oder eine Verminderung bzw. ein Aufhören der Leitfähigkeit bewirken. Eine Übersicht über die bisher angewandten Methoden der Nervenreizung findet sich in den Handbuchartikeln von Jensen (6) und Fröhlich (7). Hier sollen nur solche Reize besprochen werden, die eine Aktion auslösen. Früher war das einzige Mittel zur quantitativen Untersuchung dieser Aktionen die Muskelzuckung, die sie zur Folge haben und deren Größe, bei einer bestimmten Belastung in mm gemessen, von der Stärke des Reizes abhängig ist. Seit der Entwicklung der elektrischen Meßtechnik bietet die Registrierung des Aktionsstroms ein besseres Mittel zur Erkennung der Vorgänge im Nerven. Zunächst wurden Saitengalvanometer oder Kapillarelektrometer benutzt, die jedoch die schnellen Potentialschwankungen wegen ihrer zu großen Trägheit nicht verzerrungsfrei wiedergeben konnten. Bishop, Erlanger und Gasser führten 1922 den Kathodenstrahloszillographen in die Nervenphysiologie ein. In Deutschland wurde er zuerst von Schmitz (10) verwandt. Er arbeitet

völlig trägeheitslos und gestattet daher in Verbindung mit einem verzerrungsfreien Verstärker eine formgetreue Wiedergabe des Potentialverlaufs. Schmitz und Schaefer untersuchten mit ihm besonders die Aktionsströme bei elektrischer Reizung. Bzgl. der Ergebnisse sei auf die zusammenfassende Darstellung von Schaefer (12) verwiesen. Nur einige allgemeine Tatsachen über Aktionsströme, die zur Beurteilung der mechanischen Reizversuche wichtig sind, seien hier erwähnt.

Ein Aktionsstrom besteht darin, daß eine Welle negativen Potentials (etwa bis 30 mVolt) sich mit einer Geschwindigkeit von ca. 30 m/sec (beim Frosch) über den Nerven fortpflanzt. Mittels zweier angelegter Elektroden kann man den Potentialunterschied der beiden Stellen registrieren. Infolge des Fortschreitens der Negativitätswelle schwankt er zwischen einem negativen und positiven Wert („diphasische Ableitung“). Wird das eine Ende des Nerven durch Quetschen mit einer Pincette zerstört, so behält es stets gleiches Potential. Legt man die Ableitelektroden an die zerstörte Stelle und an eine andere Nervenstelle („monophasische Ableitung“), so registriert man den absoluten Verlauf des Potentials an der letzteren Stelle. Eine normale Aktion bei elektrischer Reizung zeigt eine Anstiegszeit von etwa $\frac{1}{1000}$ sec = 1 σ und eine Gesamtdauer von etwa 2,5 σ . Das Potential beträgt im Durchschnitt 20—25 mVolt. Diese Werte gelten bei 18° C. für den Ischiadicus des Frosches.

Ein Nerv ist ein Bündel von einzelnen Fasern. Man nimmt an, daß für diese Fasern das Alles-oder-Nichts-Gesetz gilt, d. h. daß der Aktionsstrom der Einzelfasern immer gleiche Größe und Gestalt hat. Die oben angeführten Zahlen gelten für maximale Reize, d. h. wenn alle Fasern gleichzeitig in Aktion treten. Bei schwächeren Reizen beobachtet man auch kleinere Aktionspotentiale, die so zu erklären sind, daß nur ein Teil der Fasern gereizt wird, während der andere Teil als Kurzschluß wirkt und die abgegriffene Spannung verkleinert.

Bisherige Versuche zur mechanischen Nervenreizung.

Einer der ersten, die systematisch die mechanische Nervenreizung untersuchten, war R. Tigerstedt (1). Er benutzte eine Vorrichtung, bei der kleine Gewichte aus verschiedener Höhe auf den Nerven fallen konnten. Auf der Unterseite besaßen sie eine 1 mm breite Kante, die aus Isoliermaterial war, um elektrische Reize auszuschließen. Aus Fallhöhe und Gewicht ergab sich die kinetische Energie. Tigerstedt untersuchte die Größe der Muskelzuckung in Abhängigkeit von der Energie des Reizes. Bei etwa 900 mg.mm fand er die erste schwache Zuckung, bei etwa 10 000 mg.mm maximale Zuckung. Aus seinen Angaben läßt sich berechnen, daß die Geschwindigkeit des Gewichts beim Auftreffen auf den Nerv der Größenordnung nach 10—30 cm/sec. war. Bei ihm findet sich auch der Hinweis, daß man bei richtiger Einstellung der Reizstärke die gleiche Nervenstelle in Abstän-

den von 3—5 Minuten mindestens 40 mal reizen kann, ohne daß der Nerv zerstört wird oder die Muskelzuckung deutlich abnimmt.

1887 gibt Tigerstedt einen verbesserten Apparat an (2), der statt des Gewichts einen Fallhebel besitzt.

Eine ähnliche Vorrichtung benutzt Oinuma (4). Trägheitsmoment und Fallwinkel seines Hebels können verändert werden. Dadurch lassen sich Fallgeschwindigkeiten und kinetische Energie unabhängig voneinander variieren und aus den Abmessungen des Hebels berechnen. Beim Lesen seiner Arbeit ist allerdings zu berücksichtigen, daß er irrtümlicherweise in eine Formel die Winkelgrößen in Gradzahlen statt in Bogenmaß einsetzt. Die von ihm angegebenen Werte für die Energie sind deshalb durch 57,3 und für die Geschwindigkeit durch 7,58 zu dividieren. Unter Berücksichtigung dieser Änderung findet er ähnliche Werte wie Tigerstedt. Er stellt fest, daß der Reizerfolg von der Geschwindigkeit des fallenden Hebels noch stärker als von seiner kinetischen Energie abhängt. Er nimmt an, daß der Nerv sich elastisch verhält und daß der Grad seiner Zusammendrückung deshalb nur von der kinetischen Energie des auffallenden Gewichts abhängt. In weiteren Versuchen hemmt er den Fallhebel durch Aufschlag auf eine verstellbare Schraube und kann so die Zusammendrückung des Nerven regulieren und messen. Maximale Muskelzuckungen findet er bei einer Kompression des Nerven um 20—50% seines Durchmessers, wenn die Geschwindigkeit des Hebels beim Auftreffen auf den Nerven 17 cm/sec beträgt.

Schon vorher, 1899, hatte J. v. Uexküll (3) einen anderen Apparat zur mechanischen Nervenreizung benutzt, den er Neurokinet nennt. Der Nerv wurde auf ein Elfenbeinstäbchen gelegt, das durch ein Zahnrad erschüttert wurde. Damit ließen sich sowohl Einzelzuckungen als auch Tetanus des Muskels erzielen.

In diesem Zusammenhang verdienen auch die Versuche von Ebbecke (5) Erwähnung, der hohe Drucke auf begrenzte Nervenstellen einwirken ließ und dabei ebenfalls Reizwirkungen erzielte. Eine allseitige Kompression des ganzen Nervenmuskelpräparats ergab dagegen nur schwache und unregelmäßige Reize.

Der erste, der einen elektrischen Aktionsstrom bei mechanischer Reizung registrierte, war wohl Broemser (8 u. 9). Die mechanische Reizung diente ihm allerdings nur zur bequemen Erzeugung einer Aktion, deren Form er allgemein untersuchen wollte. Zur Registrierung verwandte er ein verhältnismäßig träges Saitengalvanometer mit der Eigenfrequenz 120, sodaß eine nachfolgende Korrektur der Kurven notwendig war. Aus gewissen Nachschwankungen schloß er auf eine Reflexion der Negativitätswelle an den Nervenenden.

Problemstellung.

Auch Schmitz und Schaefer (11 u. 12) registrierten Aktionsströme bei mechanischer Reizung. Der Nerv wurde mit einem scharfkantigen

Pertinaxblatt von Hand zerquetscht und gab dabei einen Aktionsstrom, dessen Spannung maximal 5 mVolt und dessen Anstiegszeit 2—3 σ betrug. Er erscheint also wesentlich gedehnter als bei elektrischer Reizung. Dies läßt sich dadurch erklären, daß nicht alle Fasern gleichzeitig getroffen werden, wie das auch bei einer derartigen verhältnismäßig rohen Methode zu erwarten ist. An die regelmäßige Aktionswelle schließen sich außerdem unregelmäßige Potentialsalven an, die viele hundert σ dauern und auf Dauerreize an der Verletzungsstelle zurückgeführt werden. Die Untersuchung von Aktionsströmen, hervorgerufen durch mechanische Reizung, setzt also ein Gerät voraus, durch welches der Nerv in mechanisch einwandfreier Weise möglichst reproduzierbar gereizt werden kann.

Die bisher bekannten Anordnungen entsprechen nicht den heutigen Ansprüchen.

Ein fallendes Gewicht z. B., das durch den Nerven selbst oder durch eine Stellschraube gebremst wird, federt zurück und kann durch Entlastung des Nerven oder erneutes Auffallen eine doppelte Reizung bewirken. Die Aufeinanderfolge dieser Reize kann sehr gut in der Größenordnung von $\frac{1}{1000}$ sec liegen, sodaß die zugehörigen Aktionsströme sich überlagern würden.

Um solche Komplikationen auszuschließen, muß zunächst die Bewegung des Hammers so erfolgen, daß er möglichst mit konstanter Geschwindigkeit bis zu einer bestimmten Tiefe in den Nerven eindringt, dann aber plötzlich ohne Nachschwingung in dieser Stellung verharret¹⁾.

Wenn die Vorstellung richtig ist, daß die Fasern nacheinander zur Reizung gelangen und dadurch die längere Dauer der Aktion bei elektrischer Reizung bedingen, so muß man eine Abhängigkeit der Anstiegszeit von der Geschwindigkeit der Hammerbewegung erwarten.

Mit der beschriebenen Anordnung muß es auch möglich sein, die Frage zu beantworten, in welchem Zeitpunkt der Hammerbewegung der Aktionsstrom entsteht.

Der Behandlung dieser Fragen ist die vorliegende Arbeit gewidmet, für deren Anregung ich Herrn Dozenten Dr. W. Schmitz herzlichst danke²⁾. Zu besonderem Dank bin ich Herrn Professor Dr. L. Grebe für die Arbeitsmöglichkeit im Röntgenforschungsinstitut der Universität Bonn verpflichtet.

1) Auf die Kenntnis der mechanischen Energie, die der Nerv abzu-bremsen hat, muß dabei allerdings verzichtet werden. Nach den Messungen von Tigerstedt (1) und Oinuma (4) ist diese wesentlich größer als die bei elektrischer Reizung benötigte Energie, sie dürfte deshalb in keiner Beziehung zur Energie des ausgelösten Aktionsstromes stehen.

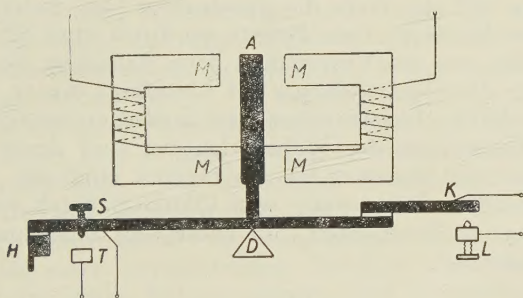
2) Herrn Dozenten Dr. H. Schaefer vom physiologischen Institut der Universität Bonn habe ich für wertvolle Ratschläge und Anleitungen, besonders bei der Präparation der Froschnerven, die mir als Physiker unbekannt war, zu danken.

Beschreibung der Apparatur.

Die Reizvorrichtung. Die ersten Versuche wurden mit einer Schalldose ausgeführt, deren Nadel den Nerven zusammendrücken sollte. Es zeigte sich jedoch, daß die erzielten Amplituden nicht groß genug waren.

Dagegen erwies sich ein vierpoliges Lautsprechersystem als geeignet, das für diesen Zweck umgebaut wurde. Die Dämpfungsvorrichtung wurde entfernt, sodaß der Anker sich zwischen den Magnetpolen frei bewegen konnte bzw. an einem der Pole festklebte. Abb. 1 zeigt die Anordnung der besseren Übersichtlichkeit wegen in halbschematischer Darstellung. Der Anker A bewegt sich zwischen den Magnetpolen M um den Drehpunkt D. Alle an ihm befestigten und mitbewegten Teile sind zur Verdeutlichung dunkel gezeichnet. Der eigentliche Reizhammer H, der auf den Nerven schlägt, besteht aus Hartgummi. An der Unterseite hat er eine 1 mm breite Kante. Er ist mit einer Schraube befestigt und kann leicht gegen Hämmer anderer Form ausgetauscht werden.

Abb. 1



In der Ruhelage klebt der durch einen nicht gezeichneten Permanentmagneten polarisierte Anker an den rechts gezeichneten Polen. Beim Einschalten eines Gleichstroms (unter Voraussetzung der richtigen Polarität) setzt er sich infolge der Anziehung der Magneten M in Bewegung, bis die Stellschraube S auf den Bügel T schlägt. T ist isoliert befestigt. Beim Aufschlag schließt sich ein Kontakt, der zur Markierung des Zeitpunktes dieses Aufschlags dienen kann. Die Bewegung des Ankers wird also plötzlich gebremst. Da die Anziehungskraft der Magneten M weiter auf ihn wirkt, federt er jedoch nicht zurück. Die Verbindung zwischen H und D ist genügend starr ausgeführt, um jede Schwingung zu vermeiden.

Am entgegengesetzten Ende ist isoliert ein Kontaktblech K befestigt, das sich bei Beginn der Bewegung von der Stellschraube L löst. Dadurch öffnet sich ein Kontakt, der die Zeitablenkung der Braunschen Röhre einleitet. Im einzelnen werden Zeitablenkung und Aufschlagmarkierung weiter unten besprochen.

Ist die Stellschraube S so eingestellt, daß der Anker sich nicht über die Mitte des Zwischenraums zwischen den Polen M hinausbewegt, so wird er nach Öffnen des Stromes wieder in die Ruhelage zurückgezogen. Um größere magnetische Kräfte und damit größere Geschwindigkeiten zu erzielen, wurde der Zwischenraum der Pole bei einem Teil der Versuche so eng gewählt, daß diese Bedingung nicht erfüllt werden konnte. Der Anker mußte dann durch einen entgegengesetzt gerichteten Strom zurückgezogen werden. Der Tastschalter, der den Strom schließt, wurde deshalb so eingerichtet, daß beim Loslassen ein Gegenkontakt einen umgekehrt gerichteten Strom schließen konnte. Der Strom wurde i. a. dem 220 Volt-Gleichstromnetz entnommen. Durch Vorschalten eines Widerstandes oder Anlegen einer kleineren Spannung konnte die Geschwindigkeit in genügenden Grenzen variiert werden. Die Hubhöhe des Hammers betrug etwa 0,5 mm. Das ist ungefähr die Dicke eines Nerven, der also völlig zerquetscht oder durchschnitten werden konnte.

Der Nerv lag auf einer kleinen glatten Platte aus Trolitul, auf der die Platinelektroden zur Ableitung des Aktionsstroms verschiebbar befestigt waren. Die Platte ließ sich auf einem Holztischchen so verschieben, daß der Nerv die gewünschte Lage unter dem Reizhammer hatte. In dieser Lage konnte sie durch eine Schraube festgehalten werden, um ein Verrutschen beim Aufschlag des Hammers zu verhindern. Der Holztisch, der als Unterlage diente, wurde von unten durch kräftige Federn gegen drei Stellschrauben gedrückt, die eine genaue Einstellung der Höhe erlaubten und damit der Tiefe, bis zu welcher der Hammer in den Nerven eindrang. Durch ein seitlich angebrachtes Mikroskop mit Okularmaßstab konnte man Nerv und Hammer beobachten und Dicke und Zusammendrückung des Nerven messen.

Registrierung der Hammerbewegung. Die Bewegung des Hammers wurde auf einem Film registriert, der auf einer rotierenden Trommel aufgespannt war. Eine lichtstarke Niedervoltlampe beleuchtete den Hammer, der oben eine scharfe Kante besaß. Das Mikroskop bildete diese Kante als Schattenbild auf dem Film ab. Dicht vor dem Film befand sich ein 0,2 mm breiter Spalt. Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel war 30 cm/sec. Sie wurde von einem Grammophonmotor angetrieben. Die genaue Bestimmung der Umdrehungsgeschwindigkeit erfolgte dadurch, daß der Hammer mit 50periodigem Wechselstrom statt mit Gleichstrom betrieben wurde. Er bewegte sich dann 50mal in der Sekunde zwischen den Magnetpolen hin und her; die Periode der dabei registrierten Bewegungskurve betrug also $\frac{1}{50}$ sec.

Um für jede Registrierung nur ein kleines Stück Film zu brauchen, wurde die rotierende Trommel mit einem Kontakt versehen, der an die Stelle des Tastschalters treten konnte und die Hammerbewegung in dem Augenblick auslöste, wo der Film den Spalt erreicht hatte. Die so erhaltenen Aufnahmen wurden ebenso wie die später

zu besprechenden Aktionsstromaufnahmen unter dem Vergrößerungsapparat nachgezeichnet und konnten dann bequem ausgewertet werden.

Es erwies sich, daß der mechanische Widerstand des Nerven, wenn dieser nicht besonders stark gequetscht wurde, keine merkliche Bremsung der Bewegung verursachte. Es war deshalb nicht notwendig, zu jeder Aktionsstromaufnahme auch die zugehörige Hammerbewegung zu registrieren, sondern diese konnte innerhalb einer Versuchsserie (bei unveränderter Stellung der Schraube S) als gleichbleibend angesehen werden bzw. nur abhängig von der Stromstärke, die durch das Lautsprechersystem geschickt wurde.

Der Hammer zeigte i. a. eine leicht beschleunigte Bewegung. Seine Geschwindigkeit konnte bis etwa 40 cm/sec gesteigert werden.

Verstärker und Braunsche Röhre. Der Nerv lag auf zwei Platinelektroden. Die dem Reiz nähere war geerdet, die andere, auf der das gequetschte Nervenende lag, führte zum Verstärker.

Zuerst wurde ein Gleichstromverstärker nach Schmitz (10) benutzt. Da jedoch langdauernde Potentialsalven bei der Problemstellung der Arbeit nicht interessierten, auch wegen der exakteren Reizmethodik wohl nicht auftraten, wurde er später durch einen 4-Röhren-Widerstandsverstärker ersetzt, der wegen seiner einfacheren Handhabung vorzuziehen ist. Er enthielt Kopplungskapazitäten von 0,5 MF bei Ableitwiderständen von 3 Megohm. Nach Untersuchungen von Schmitz (13) erlaubt er eine praktisch unverzerrte Verstärkung sogar der etwa 1 sec dauernden Elektrokardiogramme, umso mehr also der nur wenige σ dauernden Nervenaktionen. Die Empfindlichkeit wurde durch ein hochohmiges Eingangspotentiometer reguliert, das einen veränderlichen Bruchteil der Aktionsspannung dem Gitter der ersten Röhre zuführte. Der Verstärker arbeitete mit 3 Röhren RE 034 und einer Endröhre RE 084. Die verstärkten Spannungen wurden in üblicher Weise an die Ablenkplatten einer Braunschen Röhre gelegt. Die Ausschläge auf dem Schirm der Röhre wurden durch Anlegen einer Meßspannung von einigen Millivolt an den Verstärkereingang geeicht. Es wurde eine gasgefüllte Braunsche Röhre nach M. v. Ardenne mit halbindirekter Heizung benutzt, die mit einer Hochspannungsbatterie von 1100 Volt betrieben wurde.

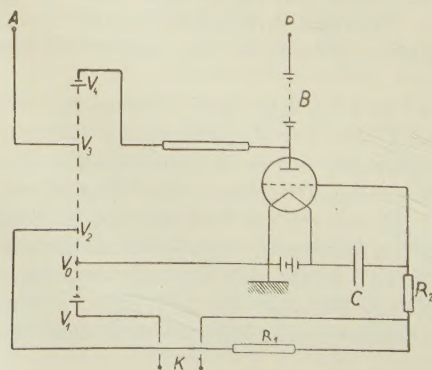
Die Zeitablenkung. Die Braunsche Röhre enthielt ein weiteres Plattenpaar, das zur Zeitablenkung diente. Dadurch wurde die registrierte Spannung auf dem Leuchtschirm der Röhre zu einer Kurve auseinandergezogen, die mit einer Leica photographiert wurde. Die Schwierigkeit lag darin, eine Vorrichtung zu bauen, die die Zeitablenkung gerade im richtigen Augenblick einleitete, sodaß die Aktionskurve etwa in der Mitte des Schirms erschien. Deshalb wurde der oben beschriebene Kontakt K, L (Abb. 1) vorgesehen, der bei Beginn der Hammerbewegung sich öffnete und die Zeitablenkung einzuleiten hatte.

Zuerst wurde versucht, mit diesem Kontakt die Zuleitung von einer Batterie zu einem Kondensator zu unterbrechen, der sich dann über einen passend gewählten Widerstand entlud. Der Kondensator war mit dem zweiten Plattenpaar der Braunschen Röhre verbunden. Da die Spannung einige hundert Volt betragen mußte, traten beim Öffnen leicht kleine Funken auf, die den Verstärker beeinflussten und starke Störungen hervorriefen. Außerdem setzte dann bei langsamer Hammerbewegung die Aktion erst ein, wenn die Zeitablenkung schon zum großen Teil abgelaufen war. Wurde umgekehrt der Aufschlag des Hammers zum Schließen eines Kontaktes benutzt, der dann eine Aufladung des Kondensators bewirken konnte, so setzte die Zeitablenkung erst ein, wenn der Aktionsstrom schon begonnen hatte. Auch war es dann sehr schwer, einen sauberen Kontakt zu erzielen.

Diese Erfahrungen zwangen zur Verwendung einer Verstärkerröhre für die Zeitablenkung. Im Gitterkreis brauchten dann nur Spannungen von einigen Volt verwandt zu werden, die beim Öffnen keine Störungen durch Funkenbildung verursachten. Es war dann auch möglich, den Beginn der Ablenkung nach Öffnen des Kontaktes noch in veränderlicher Weise um einige σ zu verzögern. Dabei konnte zur Lieferung der Ablenkspannung die Anodenbatterie des Verstärkers benutzt werden, für die Heizung der Röhren des Verstärkers und der Zeitablenkung konnte derselbe Akkumulator verwandt werden. Abb. 2 zeigt die Schaltung der Anordnung.

Bei geschlossenem Kontakt K hat der Kondensator C und damit das Gitter der Röhre das Potential V_1 . Beim Öffnen lädt er sich über den Widerstand $R_1 + R_2$ auf das Potential V_2 , und zwar mit einer Geschwindigkeit, die dem Produkt $C (R_1 + R_2)$ umgekehrt proportional ist. Beim Schließen entlädt er sich sehr schnell über den wesentlich kleineren Widerstand R_2 , der nur zum Schutze des Kondensators dient. Die Gitterspannung durchläuft dabei den gesamten

Abb. 2



Bereich der Kennlinie der Röhre RE 034, der Anodenstrom steigt von Null bis zum Sättigungswert. Die Punkte A und P sind mit den beiden Ablenkplatten der Braunschen Röhre verbunden, A gleichzeitig mit der Anode der Röhre. Dadurch ist die Spannung V_3 festgelegt. V_4 reguliert die Größe der gesamten Ablenkung. Eine Vorschaltbatterie B läßt den Brennfleck der Braunschen Röhre seitlich verschieben und wird so eingestellt, daß er bei der Bewegung gerade den ganzen Leuchtschirm ausnutzt.

Die Spannung V_2 ist so gewählt, daß die Gitterspannung ziemlich weit über den Sättigungswert hinausschießt. Dadurch wird aus der exponentiellen Ladekurve des Kondensators nur ein Stück herausgegriffen, das fast gradlinig ist. Durch Änderung der Spannung V_2 kann auch die Geschwindigkeit der Ablenkung bequem verändert werden.

Die Spannung V_1 ist ebenfalls etwas stärker negativ gewählt, als dem Fußpunkt der Charakteristik entsprechen würde. Damit wird erreicht, daß nach Öffnen des Kontaktes noch einige Zeit verstreicht, bis die Ablenkung einsetzt. Durch Variieren der Spannung V_1 verschieben sich die Kurven auf dem Leuchtschirm seitlich und können so in die günstigste Lage eingestellt werden.

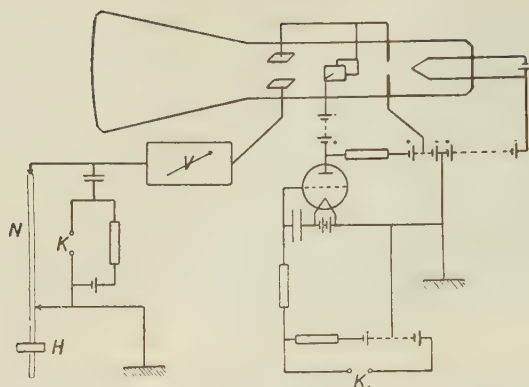
Die Eichung der Zeitablenkung erfolgt in üblicher Weise dadurch, daß die Schwingungen einer Stimmgabel in einer Spule einen schwachen Strom induzieren, der, über den Verstärker auf die Braunsche Röhre gegeben, eine Sinuskurve ergibt, deren Spitzen den Abstand $\frac{1}{435} \text{ sec} = 2,3 \sigma$ voneinander haben.

Die Abstände auf dem Leuchtschirm ergeben sich, abgesehen vom äußersten linken und rechten Ende, als praktisch zeitproportional.

Markierung des Aufschlags. Bewegung des Hammers und Aktionsstrom wurden getrennt registriert. Wenn es gelang, einen Punkt der Hammerbewegung auf der Braunschen Röhre mit abzubilden, dann konnten beide Kurven nachträglich synchronisiert und zu einem Diagramm vereinigt werden. Diesem Zweck diente der Kontakt S, T (Abb. 1). T wurde durch Verbinden mit einer Batterie über einen Widerstand von 1 Megohm auf eine Spannung von einigen Volt aufgeladen. Beim Schließen des Kontaktes, also beim Aufschlag des Hammers, wurde T entladen. Die Zuleitung zu T wurde in einigen Windungen um die Leitung zum Verstärker herumgeführt. Infolge der gegenseitigen Kapazität der Leitungen zeichnete sich der Aufschlag dann im Diagramm des Aktionsstromes als scharfe Zacke ab.

Abb. 3 zeigt ein Übersichtsschema der gesamten Registrieranordnung.

Abb. 3



H = Reizhammer, K = Kontakt zur Markierung des Aufschlags, K₁ = Kontakt für die Zeitablenkung, N = Nerv, V = Verstärker.

Technik der Versuche.

Alle Versuche wurden mit dem Nervus ischiadicus von *Rana esculenta* oder *Rana temporaria* ausgeführt. Die Nerven wurden nach der Präparation in Ringerlösung gebracht und möglichst sofort benutzt. Bei der Aufnahme der Aktionsströme wurde im Mikroskop immer die Nervendicke und die Zusammendrückung durch den Hammer gemessen. Im Anschluß an eine Versuchsserie wurde die Zeitablenkung durch Aufnahme einer Stimmgabelschwingung geeicht und die Hammerbewegung bei den verschiedenen benutzten Geschwindigkeiten registriert. Die Aufnahmen wurden auf Mimosa-Extrema-Film gemacht. Sie wurden nach der Entwicklung im Vergrößerungsapparat auf weißes Papier projiziert und mit der Hand nachgezeichnet.

Bei allen Versuchen wurde auf streng monophasische Ableitung geachtet. Der Abstand der beiden Elektroden betrug bei den meisten Versuchen 15 mm, der Abstand der ersten Elektrode vom Reizort etwa 10 mm.

Infolge der großen Verstärkungsziffer mußten äußere Störungen sorgfältig ferngehalten werden. Die Reizvorrichtung mit dem Nerven stand deshalb auf geerdetem Blech und wurde bei der Aufnahme der Aktionsströme mit einer geerdeten Blechhaube bedeckt. Es zeigte sich, daß das Einschalten des Stroms durch den Elektromagneten des Lautsprechersystems nur im ersten Augenblick Störungen hervorrief, die schon vollständig verschwunden waren, wenn die Zeitablenkung einsetzte. Dagegen verursachten Erschütterungen der Elektroden und Zuleitungen starke Störungen, wenn der Hammer heftig auf die Unterlage des Nerven schlug. Wenn er jedoch ganz kurz

vor Erreichen dieser Unterlage gebremst wurde, konnten die Erschütterungen höchstens durch den Nerven selbst übertragen werden und verursachten dann keine merklichen Störungen.

Vorversuche.

In einigen orientierenden Vorversuchen wurde ein Nerv-Muskelpräparat verwandt und die Muskelzuckung statt des Aktionsstroms zur Anzeigung des Reizerfolges benutzt. Bei einer langsamen Hammergeschwindigkeit von 3 cm/sec mußte der Nerv auf mindestens 10% seiner Dicke zusammengedrückt werden, um eine schwache Zuckung zu erzielen. Er war dann offenbar zerstört und sah stark eingebuchtet aus. Der Reiz ließ sich an dieser Stelle nicht wiederholen. Bei einer Hammergeschwindigkeit von 30 cm/sec genügte eine Zusammendrückung auf 50%, um starke Zuckungen zu erreichen. Bei richtiger Einstellung ließ sich die Reizung in Abständen von einigen Sekunden mindestens 50mal wiederholen, ohne daß die Zuckung merklich schwächer wurde. Ein schwacher Reizerfolg trat meist schon bei einer Kompression auf nur 80% des Durchmessers auf, doch ließ er sich oft nicht wiederholen. Bei stärkerer Kompression als 50% nahm die Zuckung nicht mehr merklich zu, der Nerv wurde dabei leichter geschädigt. Bei mittlerer Hammergeschwindigkeit (10 cm/sec) war der Erfolg unsicherer. Die Zeit, in der die Zusammendrückung erfolgt, beträgt bei den erwähnten Geschwindigkeiten etwa $\frac{1}{100} - \frac{1}{1000}$ sec.

Der Reizhammer konnte auch mit 50periodigem Wechselstrom betrieben werden. Er führte dann keine sinusförmige Bewegung aus, sondern 50mal pro Sekunde, eine ähnliche Bewegung wie bei Gleichstrombetrieb mit ca. 20 cm/sec Geschwindigkeit. Bei etwa 50%igem Eindringen war Tetanus des Muskels zu beobachten.

Erwähnenswert ist noch, daß auch bei der Entlastung des Nerven meist schwächere Muskelzuckungen auftraten, wie sie auch bei Jensen (6) erwähnt werden.

Allgemeine Beobachtungen über Aktionsströme bei mechanischer Reizung.

Bei der Registrierung von Aktionsströmen fiel zunächst auf, daß es mit mechanischer Reizung niemals gelang, maximale Aktionen hervorzurufen. Bei elektrischer Reizung beträgt (nach Schaefer, 12) die Spannung einer maximalen Aktion 15—20 mVolt, im Höchstfall sogar 30 mVolt. Bei mechanischer Reizung, die so eingestellt war, daß sie den Nerven nicht zerstörte, ergaben sich Spannungen von 1—2 mVolt. Wurde der Reiz so stark gewählt, daß der Nerv zerquetscht wurde und bei Wiederholung keine oder sehr schwache Aktionen gab, so betrug die Spannung 3—6 mVolt. Noch stärkere Reize wurden dadurch erzielt, daß die 1—2 mm breite Hartgummikante durch eine Rasierklinge ersetzt wurde, die den Nerven stark

zerstörte oder völlig durchschnitt. Die Klinge war isoliert angebracht, um elektrische Reize mit Sicherheit auszuschließen. Dabei zeigten sich Aktionen von 7—12 mVolt. Die höchste beobachtete Spannung bei völliger Durchschneidung betrug 14,5 mVolt. Die angeführten Werte gelten für Nerven der Weibchen von *Rana temporaria*, die sich längere Zeit in der Gefangenschaft befunden hatten. Spätere Versuche mit Nerven von frisch gefangenen Tieren (Männchen von *Rana esculenta*) gaben auch schon bei gut wiederholbaren Reizen mit breitem Hartgummihammer Aktionsspannungen bis 12 mVolt.

Jedenfalls dürfte feststehen, daß nach dem Alles- oder Nichts-Gesetz fast niemals alle Fasern in Tätigkeit waren. Da außerdem die Lage der einzelnen Fasern zueinander und zum Hammer nach einem Stoß sicher nie ganz unverändert war (eine leichte Eindellung des Nerven war meist zu beobachten), so ist es nicht verwunderlich, daß bei wiederholter Reizung die Aktionen in Spannung und Kurvenform nie völlig identisch waren. Bei allen Versuchen wurde auf streng monophasische Ableitung geachtet. Die Kurvenform ist ganz ähnlich der bei elektrischer Reizung erzielten, jedoch ist die Anstiegszeit oft nicht so gut definiert, weil die Kurve erst sehr flach, dann steiler ansteigt.

Abb. 4

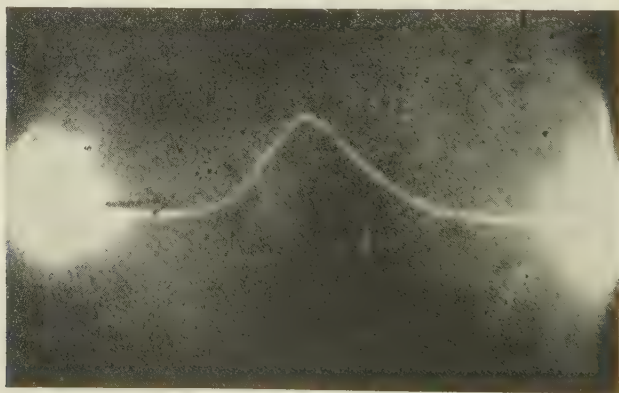


Abb. 4 zeigt als Beispiel eine Originalaufnahme eines solchen Aktionsstromes, der bei einer Hammergeschwindigkeit von 20 cm/sec gewonnen ist. Die Erscheinung kann vielleicht so erklärt werden, daß einige Fasern schon vor der großen Menge der anderen getroffen werden. Ähnliche Ursachen dürfte es haben, daß manchmal die Spitze der Kurve undeutlich ist und stark verbreitert erscheint. Nachpotentiale wurden auch bei starker Zerstörung des Nerven nicht beobachtet.

Ermüdungserscheinungen.

Bei wiederholter Reizung nahm die Höhe der Aktionsspannung allmählich ab. Nach einer eingeschalteten Pause erholte sich der Nerv jedoch wieder, wenn der Reiz nicht so stark war, daß er offenbar zerstörend gewirkt hatte. Ein Beispiel möge dies erläutern:

Der Hammer war so eingestellt, daß er den Nerven auf 0,2 mm (etwa 40% seines Durchmessers) zusammendrückte. Die gleiche Stelle wurde wiederholt gereizt. Folgten die Reize in 1 sec Abstand, so nahm die Aktionsspannung nach 4—5 Reizen bis auf Null ab. Bei Reizung in 20 sec Abstand ergaben sich Spannungen fast gleichbleibender Größe. Nacheinander wurden gemessen: 1,25 mVolt, 1,25 mVolt, 0,93 mVolt, 1,10 mVolt. Dann wurde eine Pause von 3 Minuten eingeschaltet mit dem Erfolg, daß die Spannung der nächsten Aktion 1,7 mVolt betrug. Die Geschwindigkeit des Hammers bei diesem Versuch war 30 cm/sec.

Zeitpunkt der Aktion und Einfluß des Kompressionsgrades.

Die Aktion braucht eine gewisse Zeit, um die Strecke vom Reizort bis zur Elektrode zu durchlaufen. Ändert man den Abstand beider, so muß sich die Kurve im Vergleich zum Zeitpunkt des Reizes verschieben. Daraus kann man die Leitungsgeschwindigkeit und den Zeitpunkt des Entstehens der Aktion am Reizort ermitteln. Die Methode leidet bei mechanischer Reizung allerdings daran, daß zwei Aktionen kaum völlig gleich sind. Die Bestimmung ist deshalb nicht so genau wie bei elektrischer Reizung.

Bei einem Versuch wurde die gleiche Stelle wiederholt gereizt, dabei die Elektroden um 1 cm verschoben. Der Fußpunkt der Kurve verschob sich dabei, vom Aufschlag des Hammers gerechnet, um 0,3 σ . Das bedeutet eine Leitungsgeschwindigkeit von 30 m/sec und entspricht dem normalen, bei elektrischer Reizung gefundenen Wert. Der Abstand der Elektrode vom Hammer betrug bei den meisten Versuchen etwa 1 cm. Die Zeit, die zum Durchlaufen dieser kurzen Strecke nötig ist, ändert sich nicht wesentlich, wenn die Leitungsgeschwindigkeit etwas von 30 m/sec verschieden ist. Dieser Wert konnte deshalb bei der Zurückführung der Kurven auf den Potentialverlauf in unmittelbarer Nähe des Reizortes allgemein angenommen werden. Es zeigte sich, daß der Anstieg der Aktion i. a. etwa beginnt, wenn der Hammer den tiefsten Punkt erreicht hat. Ein späterer Beginn wurde nie beobachtet, dagegen oft ein etwas früherer, besonders bei langsamer Reizung. Im einzelnen werden solche Kurven noch weiter unten besprochen.

Bei gleicher Hammersgeschwindigkeit konnte der Reiz verstärkt werden, indem die Tiefe, bis zu welcher der Hammer in den Nerven

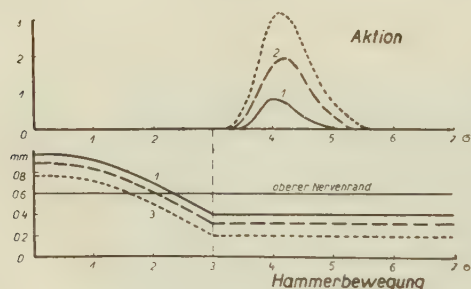
eindrang, vergrößert wurde. Dabei nahm die Spannung und die zeitliche Ausdehnung der Aktion zu. Ein Beispiel möge dies erläutern:

Ein 0,6 mm breiter Nerv wurde je zweimal durch Kompression auf 0,4, 0,32 und 0,2 mm gereizt. Die folgende Tabelle gibt die Daten der erzielten Aktionen:

Kompression auf	Spannung in mVolt	Anstiegszeit in σ	Gesamtdauer in σ
0,4 mm	0,85	0,6	1,4
	0,85	0,7	1,6
0,32 mm	2,0	0,9	2,1
"	2,0	0,9	1,9
0,2 mm	3,25	0,9	2,3
"	4,5	1,0	2,1

Abb. 5 zeigt drei dieser Aktionsbilder mit den zugehörigen Hammerbewegungen, die in der beschriebenen Weise synchronisiert sind. Die Hammerbewegung ist als Abstand der unteren Kante des Ham-

Abb. 5



mers von der Unterlage der Nerven dargestellt. Bei 0,6 mm befindet sich der obere Rand des Nerven. Die Elektrode war 6 mm vom Reizort entfernt; die Aktionskurven sind also um 0,2 σ nach links zu rücken, wenn man ihre Entstehung am Reizort betrachten will. Die Temperatur betrug 17° C.

Einfluß der Hammergeschwindigkeit.

Wenn die von Schmitz und Schaefer gefundene verhältnismäßig lange Anstiegszeit der Aktion bei mechanischer Reizung (2—3 σ) darauf zurückzuführen ist, daß die Fasern nacheinander getroffen werden, so muß sich eine Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Reizung feststellen lassen. Bei langsamer Hammerbewegung muß die Aktion gedehnter erscheinen als bei schneller Bewegung.

Dem wirkt jedoch teilweise die Tatsache entgegen, daß bei kleinerer Geschwindigkeit die Aktion überhaupt kleiner wird. Das bedeutet wohl, daß die ersten Fasern erst bei stärkerer Zusammendrückung gereizt werden als bei schneller Bewegung. Trotzdem läßt sich die vermutete Verbreiterung in den meisten Fällen beobachten. Am deutlichsten ist sie, wenn die Unterschiede der Geschwindigkeiten nicht allzu groß gewählt werden.

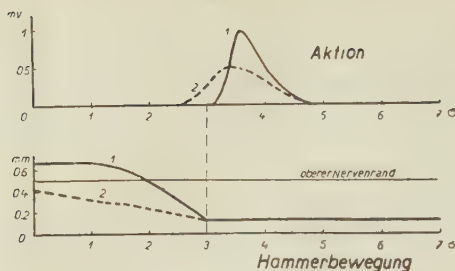
Einige Versuchsergebnisse sollen dies erläutern. Allen diesen Versuchen ist gemeinsam, daß die gleiche Nervenstelle bei gleich tiefem Eindringen des Hammers abwechselnd schnell und langsam gereizt wurde. Falls der Hammer keine ganz gleichmäßige Bewegung ausführte, ist als Reizgeschwindigkeit die Geschwindigkeit des Hammers kurz vor dem Erreichen seines tiefsten Punktes angegeben, da die Aktionen vorzugsweise in diesem Augenblick entstehen. Da bei der ersten Berührung des Nerven sicher noch keine Aktionen entstehen, scheint die Angabe der Zeitdauer des Reizvorgangs von geringerer Bedeutung zu sein.

In der nachfolgenden Tabelle ist das Ergebnis einer Versuchsreihe der beschriebenen Art zusammengefaßt. Die Aufnahmen erfolgten in Abständen von etwa 30 sec (Temperatur 18° C, ableitende Strecke 10 mm).

Geschwindigkeit des Hammers	Anstiegszeit in σ	Gesamtdauer in σ	Spannung in mVolt
10 cm/sec	0,9	2,5	0,55
"	0,8	1,85	0,5
"	0,8	1,7	0,43
"	0,6	1,5	0,38
40 cm/sec	0,5	1,5	1,0
"	0,5	1,4	1,05
"	0,55	1,7	1,15
"	0,6	1,7	0,85
"	0,5	1,7	0,85
"	0,55	1,5	0,9
Durchschnitt bei			
10 cm/sec	0,78	1,89	0,46
40 cm/sec	0,53	1,58	0,97

Abb. 6 zeigt zwei charakteristische Aktionsströme aus dieser Versuchsserie mit den zugehörigen Hammerbewegungen. Da die ableitende Strecke 10 mm betrug, muß man sich die Aktionskurven um 0,3 σ nach links verschoben denken, wenn man ihre Entstehung am Reizort betrachten will. (Ähnliches gilt auch für alle später gezeigten Aktionskurven).

Abb. 6



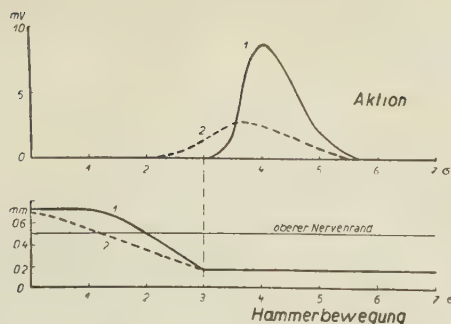
Bei anderen Versuchen war der Hartgummihammer durch eine isoliert befestigte Rasierklinge ersetzt. Der Nerv wurde fast völlig durchschnitten. Zum Unterschied von den übrigen in diesem Abschnitt beschriebenen Versuchen mußte deshalb für jede Reizung eine neue Nervenstelle, die der Elektrode näher lag als die vorige, benutzt werden. Es folgt in Tabellenform das Ergebnis einer solchen Versuchsreihe: (Temperatur 16° C):

Geschwindigkeit des Hammers	Anstiegszeit in σ	Gesamtdauer in σ	Spannung in mVolt
35 cm/sec	1,25	2,5	7,7
"	0,85	2,1	6,8
"	1,0	2,5	7,8
20 cm/sec	2,1	4,4	2,5
"	2,3	5,4	4,3
"	2,1	4,2	7,7
Durchschnitt bei			
35 cm/sec	1,03	2,37	7,4
20 cm/sec	2,23	4,67	4,8

Im Gegensatz zu den vorigen Versuchen wurden die nächsten Versuche mit frisch gefangenen Fröschen ausgeführt. Es wurde immer die gleiche Stelle mit einem 2 mm breiten Hartgummihammer gereizt. (Temperatur 17,5°C, ableitende Strecke 10 mm). Die folgende Tabelle gibt das Ergebnis dieser Versuchsserie, Abb. 7 zeigt zwei Aktionsströme dieser Serie mit den zugehörigen Hammerbewegungen bei schneller (1) und langsamer (2) Hammergeschwindigkeit.

Geschwindigkeit des Hammers	Anstiegszeit in σ	Gesamtdauer in σ	Spannung in mVolt
35 cm/sec	0,95	2,65	8,8
"	0,9	2,6	12,1
"	1,1	2,4	8,5
20 cm/sec	1,55	3,7	4,1
"	1,5	3,3	3,0
"	1,65	4,4	3,0
Durchschnitt bei			
35 cm/sec	0,95	2,55	9,8
20 cm/sec	1,57	3,8	3,37

Abb. 7



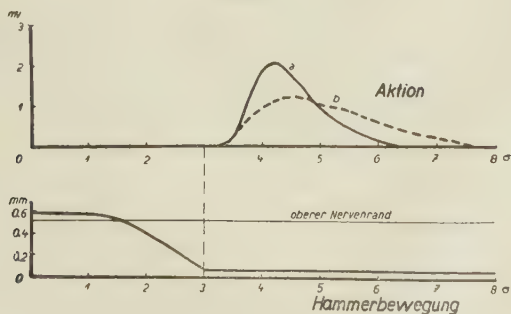
Unter gleichen Bedingungen ist das nächste Beispiel gewonnen (Temperatur 17° C, Reizung in 2 min Abstand):

Geschwindigkeit des Hammers	Anstiegszeit in σ	Gesamtdauer in σ	Spannung in m Volt
20 cm/sec	1,6	3,9	2,95
"	1,25	3,5	1,57
35 cm/sec	0,95	3,3	6,4
"	0,75	3,3	5,9
Durchschnitt bei			
20 cm/sec	1,43	3,7	2,26
35 cm/sec	0,85	3,3	6,15

Besondere Aktionsformen.

Wurde der Reiz so stark gewählt, daß der Nerv verletzt wurde, so ergab sich dabei meist ein normaler Aktionsstrom. Wenn der Reiz dann an derselben Stelle wiederholt wurde, zeigte sich häufig ein wesentlich schwächerer Aktionsstrom, der im Vergleich zum ersten langgestreckt und unregelmäßig aussah. Abb. 6 zeigt zwei solche Aktionen mit der zugehörigen, jetzt für beide gleichen, Hammerbewegung. Der Nerv war vorher an dieser Stelle noch nicht gereizt worden, die zweite Reizung fand eine Minute nach der ersten

Abb. 8



statt. Die Temperatur betrug 17° C, die ableitende Strecke 10 mm. In der Abbildung ist die erste Aktion mit a, die zweite (nach der Verletzung) mit b bezeichnet.

Zusammenfassung.

Die bisher veröffentlichten Untersuchungen über mechanische Nervenreizung werden zusammengestellt und verglichen. Dann wird eine Anordnung beschrieben, die es gestattet, mechanische Reize genau definierter Art zu geben und die dabei auftretenden Aktionsströme zu registrieren. Der Reizhammer wird elektromagnetisch betätigt, seine Bewegung wird auf bewegtem Film registriert. Die durch Platinelektroden vom Nerv abgenommenen Aktionsspannungen werden in einem Vier-Röhren-Verstärker verstärkt und zu den Ablenkplatten einer Braunschen Röhre geleitet. Das andere Plattenpaar dient für die Zeitablenkung. Diese ist mit der Bewegung des Reizhammers gekoppelt, ihre Geschwindigkeit und der Zeitpunkt ihres Beginns können verändert werden. Die Aufnahmen des Aktionsstroms und der Hammerbewegung werden synchronisiert, indem der Aufschlag des Hammers auf dem Aktionsstromdiagramm mit abgebildet wird.

Zur Orientierung werden einige Vorversuche mit Nerv-Muskelpräparaten ohne Aufzeichnung des Aktionsstroms gemacht. Sie ergeben, welche Hammergeschwindigkeiten und welche Grade der Zusammendrückung des Nerven in Frage kommen.

Bei der Aufnahme der Aktionsströme zeigt sich, daß keine maximalen Reize zu erzielen sind, d. h. daß bei mechanischer Reizung fast nie alle Fasern in Tätigkeit treten.

Infolgedessen sind bei Wiederholungen die Aktionskurven nie völlig gleich.

Insbesondere ist zu beobachten, daß bei wiederholter Reizung derselben Stelle die Spannung allmählich abnimmt, nach einer eingeschalteten Pause von einigen Minuten jedoch wieder größer wird.

Der Zeitpunkt, wo der Anstieg der Aktion beginnt, liegt i. a. kurz vor dem tiefsten Punkt der Hammerbewegung.

Die Aktionen bei verschiedener Hammergeschwindigkeit werden ausführlich verglichen. Die Spannung ist bei schnellen Reizen wesentlich höher (bei gleicher Zusammendrückung), die Anstiegszeit und Gesamtdauer deutlich kleiner.

Bei verletzten Nerven treten besonders langgestreckte Aktionskurven unregelmäßiger Form auf.

LITERATUR

1. R. Tigerstedt, Studien über die mechanische Nervenreizung, Helsingfors 1880.
2. — Zur mechanischen Nervenreizung. Beiträge zur Physiologie, Carl Ludwig zum 70. Geburtstag. Leipzig 1887, S. 82.
3. J. v. Uexküll, Der Neurokinet, Zeitschrift f. Biol. 38 (1899).
4. S. Oinuma, Beiträge zur Theorie der mechanischen Nervenregung. Zeitschr. f. Biologie 53 (1910).
5. U. Ebbecke, Wirkung allseitiger Kompression auf den Froschmuskel. Pflügers Archiv f. d. ges. Physiol. 157 (1914).
6. P. Jensen, Methoden der mechanischen, thermischen, chemischen und osmotischen Reizung von Muskeln und Nerven. Abderhaldens Handb. d. biol. Arbeitsmethoden Abt. V, Teil 5 A.
7. F. W. Fröhlich, Nervenreize. Handb. d. norm. u. path. Physiol. Bd. 9, S. 177 (1929).
8. Ph. Broemser, Über die Form des monophasischen Nervenaktionsstroms. Zeitschr. f. Biol. 78 (1923).
9. — Über die Form des monophasischen Nervenaktionsstroms. Zeitschr. f. Biol. 79 (1923).
10. W. Schmitz, Die Registrierung von Aktionsströmen mit dem Kathodenstrahloszillographen. Pflügers Archiv 232 (1933).
11. W. Schmitz u. H. Schaefer, Über den Nervenaktionsstrom und die positive Nachschwankung. Pflügers Archiv 232 (1933).
12. H. Schaefer, Neuere Untersuchungen über den Nervenaktionsstrom. Ergebnisse der Physiologie u. exp. Pharmakologie 36 (1933).
13. W. Schmitz u. H. Schaefer, Zur Technik und Deutung des Elektrokardiogramms. Zeitschr. f. d. ges. exp. Medizin 96 (1935).

LEBENS LAUF.

Ich, Werner Wiebe, wurde am 11. März 1913 in Mülheim (Ruhr) geboren als Sohn des damaligen Lehrers Wilhelm Wiebe und seiner Ehefrau Elisabeth geb. Koch. Ich bin evangelischer Konfession.

Nach dem Besuch des staatlichen Realgymnasiums in Mülheim (Ruhr) erhielt ich Ostern 1931 das Zeugnis der Reife.

Im Anschluß daran besuchte ich je drei Semester die Universitäten Göttingen und Freiburg, wo ich Physik, Mathematik und Chemie studierte, um mich auf das Lehramt an höheren Schulen vorzubereiten. Seit Ostern 1934 bin ich an der Universität Bonn immatrikuliert. Im Herbst 1934 legte ich das physikalische Verbandsexamen ab und widmete mich seit Ostern 1935 der Anfertigung der vorliegenden Arbeit.

Die mündliche Prüfung fand am 24. Juni 1936 statt.

